

文章编号: 0253-9985(2007)01-0110-06

应用分形理论研究鄂尔多斯 MHM 油田 低孔渗储层孔隙结构

张宸恺¹, 沈金松^{1,2}, 樊震³

(1 中国石油大学 资源与信息学院 地球物理系, 北京 102249)

(2 中国石油天然气股份有限公司 物探重点实验室, 北京 102249)

(3 中国石油天然气股份有限公司 新疆油田分公司 人事处, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要: 基于岩样的毛管压力分析数据, 讨论了岩石孔隙结构的分形特征。用孔径小于某一值 r 的孔隙体积百分比 S 与 r 的拟合关系, 计算了鄂尔多斯盆地西部 MHM 油田三叠系延长组和侏罗系延安组低孔、低渗储层孔隙结构的分形维数。计算结果表明, 两个层段的毛管压力曲线都存在一个标度区间, 在该区间内孔隙结构表现出分形特征。同一块样品的大孔隙段与小孔隙段表现出多重分形, 延 10 段储层孔隙结构的分形维数在大孔隙段比小孔隙段小, 而长 6 段储层的分形维数分布特征却与延 10 段储层相反。在大孔隙区间延 10 段的分形维数比长 6 段小, 反映出长 6 段储层孔隙结构比延 10 段复杂。研究分析认为, 利用孔隙结构分形维数并结合其他孔隙特征参数, 可以很好的反映出储层微观孔隙结构的复杂性, 为研究储层孔隙结构微观非均质性提供了一个方便有效的手段, 并为进一步的储层评价奠定了基础。

关键词: 毛管压力; 分形维数; 孔隙结构; 低孔低渗储层; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: 112.2 **文献标识码:** A

Pore structure study of low porosity and permeability reservoirs in MHM oilfield of Ordos Basin with fractal theory

Zhang Chenkai¹, Shen Jinsong^{1,2}, Fan Zhen³

(1. China University of Petroleum, Beijing 102249 China;

2. Key Laboratory of Geophysical Exploration, PetroChina, Beijing 102249 China;

3. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay Xinjiang 834000 China)

Abstract Fractal features of pore structure are studied by using analytic data of capillary pressure of core samples. The fitting relationship between the volume percentage (S) of pores with pore diameter smaller than a given value (r) and the pore diameter (r) is used to calculate the fractal dimension of pore structure of the low porosity and permeability reservoirs in the Triassic Yanchang Formation and Jurassic Yan'an Formation of MHM oilfield, Ordos basin. The capillary pressure curves of both formations have a scale interval in which pore structure shows fractal features. The macropore and micropore intervals of same core sample show multi-fractal features. For the 10th member of Yan'an Formation (Yan 10 reservoir), the fractal dimension of pore structure in macropore interval is larger than that in micropore interval while for the 6th member of Yanchang Formation (Chang 6 reservoir), the distribution of fractal dimension is just the opposite. In macropore interval, the fractal dimension of Yan 10 reservoirs is smaller than that in Chang 6 reservoirs, indicating that the pore structure of the latter is more complex than that of the former. Fractal dimension of pore structure, in conjunction with the other pore characteristic parameters, can well reflect the complexity of microscopic pore structure. It provides a convenient

收稿日期: 2006-05-17

第一作者简介: 张宸恺 (1974—), 男, 硕士研究生, 地球物理

and effective method for study on the microscopic heterogeneity of reservoir pore structure and a solid basis for further reservoir evaluation

Key words capillary pressure; fractal dimension; pore structure; low porosity and low permeability reservoir; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地西部 MHM 油田位于鄂尔多斯盆地西缘南区构造带的沙井子北段, 天环拗陷中部, 区域构造为一平缓的西倾单斜^[1, 2]。侏罗系延安组储层岩性以岩屑石英砂岩、长石石英砂岩为主^[3], 主要含油层延安组 10 段孔隙度均值为 12.50%, 渗透率几何平均为 $2.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。三叠系延长组以长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩为主, 主要含油层长 6 段孔隙度均值为 14.49%, 渗透率几何平均值为 $6.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。延安组和延长组储层具有低孔、低渗、孔隙结构复杂的特点^[4, 5]。储层物性及孔隙结构的研究成为该区含油气储层评价的关键。

对孔隙结构的研究, 国内外研究人员已做了大量工作^[6-9]。为研究孔隙度与渗透率、含油气饱和度及采收率之间的关系, 前人提出了多种描述孔隙结构的参数, 如孔隙度、孔喉比、孔喉配位数, 等。这些参数可在一定程度上描述孔隙结构的分布特征, 但仍有一定的局限性。如相同孔隙度但不同孔隙结构的地层, 渗透率表现出巨大差异, 从而影响油气充注, 造成不同的含油气性。对于复杂的孔隙结构, 经典的欧氏几何学方法已难以给出合理的描述, 目前主要用统计学方法给出孔隙结构分布的平均特性或分布趋势, 并用多种经验关系建立储层各种物性参数的关系^[10, 11]。

分形几何是在七十年代末发展起来的描述不规则形体、随机现象及复杂过程的一个新兴数学分支^[12]。由于其对复杂特征的精确描述, 逐渐为地学、计算机图形学等学科所广泛应用^[13]。本文从毛管压力资料入手, 应用分形几何理论, 导出了储层孔隙结构的分形维数计算关系, 利用 $S-r$ 拟合方法, 计算了 MHM 油田三叠系延长组和侏罗系延安组低孔渗储层孔隙结构的分形维数, 分析了两个储层段孔隙结构的差异性及由此造成的含油气性差别。通过样品压汞数据的分析知道, 两个主要含油气层段的储层孔隙结构存在多重分形特征, 揭示了不同类型储层的多种形成机理, 证实了鄂尔多斯盆地 MHM 油田储层评价中应用双孔隙模型的必要性。

1 分形维数的定义

分形几何的研究对象是非线性系统中具有某种自相似性的处处不可微的现象, 与欧氏空间的研究方法类似, 分形空间的最基本特征量是分形维数。目前, 分形维数还没有统一的定义, 不同研究人员根据问题的性质或应用领域提出了不同的定义。为研究抽象空间集合的测度, 数学上定义了 Hausdorff 测度与 Hausdorff 维数。为计算几何体或不规则点集的分形维数, 数学上提出了计盒维数的计算方法。对于常用的研究孔隙结构特征的铸体薄片资料, 通常采用计盒维数来定义^[14]:

$$D_f = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln \frac{1}{r}} \quad (1)$$

式中: D_f 为分形体的计盒维数; $N(r)$ 为与孔隙相交的剖分网格数; r 是剖分网格的线度 (正方形或立方体的边长)。

对于处于三维空间的孔隙分布, 其计盒分维数小于 3^[15], 且孔隙结构的分形维数与储集层孔隙结构的复杂程度相关, 其分形维数处于 2~3 之间。若分形值越接近于 3 表明储集层孔隙结构越复杂, 非均质性越强, 相应地储层的渗透性越差。

2 孔隙结构分形特征与分形维数计算的关系

不同沉积环境及成岩作用过程造成的孔隙结构特征不同, 由铸体薄片及压汞分析资料知道, 尽管孔隙结构极不规则, 难于用常规的参数描述, 但孔隙结构具有良好的统计自相似性, 表现出复杂的单分维或多分维特征^[16]。

由分形几何原理知道, 若储层孔隙孔径分布符合分形结构, 储层中孔隙孔径大于 r 的累积孔隙体积 $N(r)$ 和 r 有如下关系^[17, 18]:

$$N(r) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} P(r) dr \quad (2)$$

式中: $r_{\max}$ 为储层中最大孔隙半径; $p(r)$ 为孔径分布密度函数。

对于光滑三维形体的体积, 可用一个线度为 r 的正方体 (或球) 来进行计量, 而且测出的覆盖个数 n 与三维形体的体积之间存在如下关系:

$$V = nr^3 \quad (3)$$

相应地, 欧氏空间拓扑维数与孔隙体积分布、线度之间的关系:

$$V = mr^{3-D_f} \quad (4)$$

式中: V 为半径 r 的孔隙所占的体积; m 为比例常数; D_f 为孔隙的分形维数, 值处于 2~3 之间。孔径分布的密度函数及孔径小于 r 的累积孔隙体积 $V(r)$ 的关系, 可通过 (4) 式对 r 求导得到:

$$\frac{dV}{dr} = (3 - D_f)m r^{2-D_f} \quad (5)$$

$$V(r) = \int_{r_{\min}}^r (3 - D_f)m r^{2-D_f} dr$$

入流体速度、注入量与施加压力的关系, 进而研究孔隙结构特征的一种方法。由于不同压力水平, 注入流体对应于不同级别的孔喉, 利用压汞得到的毛管压力数据基本可以反映孔隙结构的分形维数。本文根据压汞进入小于给定直径的孔隙体积的百分数与直径的对应关系, 采用线性拟合方法求取孔隙结构的分形维数。在给定压力条件下进入孔隙的流体展布于三维孔隙空间中, 与铸体薄片相比能更好地描述孔隙结构的分布特征, 且基本不受切片方位等因素影响。

以式 (10) 为基础, 利用毛管压力测试数据, 在双对数坐标纸上, 绘制出 S 与 r 的双对数关系, 若点的分布为直线, 则确定的直线斜率即为三维 Hurst 指数 H , 用 3 减去该指数即得到分形维数 D_f [20] 即:

$$D_f = 3 - H \quad (11)$$

4 MHM 油田延安组 10 段及延长组

$$\lg S = (3 - D_f) \lg r - (3 - D_f) \lg r_{\max} \quad (10)$$

对上式两边取对数得:

$$\lg S = (3 - D_f) \lg r - (3 - D_f) \lg r_{\max} \quad (10)$$

3 利用毛管压力曲线求取分形维数

基于铸体薄片孔隙分布的统计, 采用计盒维数定义计算孔隙结构的分形维数, 是从二维平面的角度研究三维孔隙分布, 得到的分维值与薄片切取方位、孔隙的不规则程度相关。对于相同岩样, 不同的切片会得到差别较大的分维结果, 从而影响孔隙结构参数的计算精度 [19]。而在三维空间若不破坏孔隙结构则无法实现计盒维数的统计。毛管压力曲线是通过向岩样中注入流体, 测定注

入流体速度、注入量与施加压力的关系, 进而研究孔隙结构特征的一种方法。由于不同压力水平, 注入流体对应于不同级别的孔喉, 利用压汞得到的毛管压力数据基本可以反映孔隙结构的分形维数。本文根据压汞进入小于给定直径的孔隙体积的百分数与直径的对应关系, 采用线性拟合方法求取孔隙结构的分形维数。在给定压力条件下进入孔隙的流体展布于三维孔隙空间中, 与铸体薄片相比能更好地描述孔隙结构的分布特征, 且基本不受切片方位等因素影响。

图 1 是 MHM 油田 2P-1 井延 10 层段 38 号 (2 525.99 m) 样品的湿相饱和度 S 与孔隙半径 r 在双对数坐标系中的拟合关系。由图可以看出, 直线段出现时对应的孔隙半径 r 为 6.3 μm , 对应的毛管压力为 0.116 7 MPa, 并且很明显在孔隙半径 0.1~0.006 3 μm 之间出现了转折, 在相对大孔隙度段孔隙结构分形维数为 2.527 3, 而小孔隙度段对应的孔隙结构分形维数为 2.878 4, 延 10 层段小孔隙区域比大孔隙区域孔隙结构非均质性强。

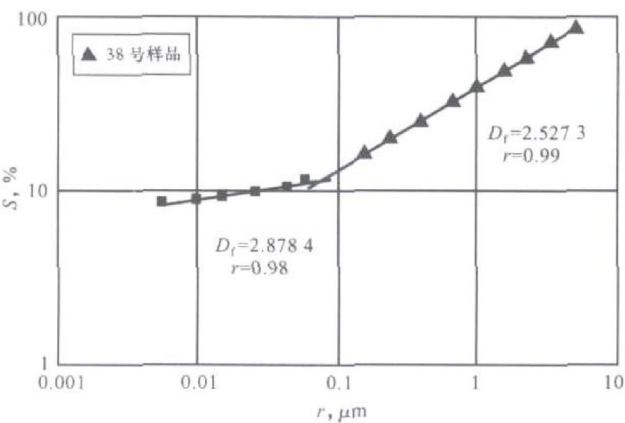


图 1 38号样品孔隙半径与压汞饱和度拟合关系曲线

Fig. 1 Fitting curve of pore radius to mercury-injection saturation for No. 38 sample

图 2 是 MHM 油田 2P-2 井长 6 段 332 号 (2 938.42 m) 样品的 $S-r$ 拟合关系图。图中反映出该样品所在储层也存在两种孔隙结构, 在大孔隙区域孔隙结构分形维数为 2.851 1, 在小孔隙段孔隙结构分形维数为 2.573 7。由这两段分形特征直线段反映出, 长 6 储层大孔隙段比小孔隙段的孔隙结构非均质强, 其规律与延 10 相反。结合岩心资料分析认为, 流体对长 6 段储层中大孔隙的溶蚀作用比较明显, 而在小孔隙区, 毛细压力

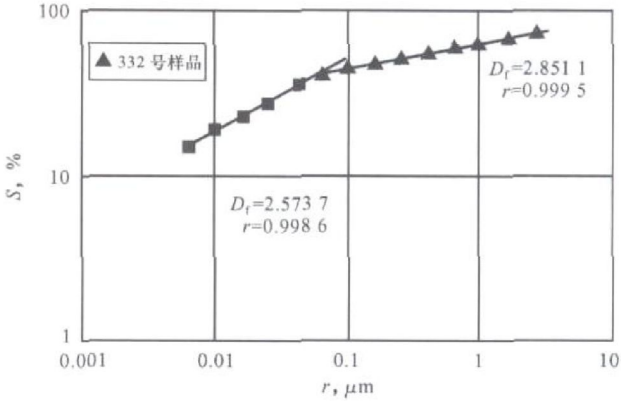


图 2 332号样品孔隙半径与压汞饱和度拟合关系曲线

Fig. 2 Fitting curve of pore radius to mercury-injection saturation for No. 332 sample

较大, 溶蚀流体不易进入, 造成了长 6 段储层大孔隙段的分形维数比小孔隙段的分形维数大的结果。

按上述方法对 MHM 油田 2 口井长 6 段和延 10 段共 118 个岩样的压汞资料进行了拟合, 计算出了各岩样的孔隙孔径分布的分形维数。部分样品的分析结果如表 1 所示。考虑到孔径小于 0.1 μm 的小孔隙段对渗透率的贡献很小, 实际生产意义不大, 文中只统计了储层中大孔隙段的孔隙结构分形维数。

表 1 MHM 油田延 10 段和长 6 段储层孔隙结构参数

Table 1 Pore structure parameters of Yan 10 and Chang 6 reservoirs in MHM oil field

井号	样品样点	层位	渗透率 / ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	孔隙度, %	分选系数	分形维数	$S-r$ 拟合 相关系数	渗透率 变异系数
2P-1	1	延 10	0.12	7.53	3.05	2.62	0.997 9	7.20
	3	延 10	1.16	12.00	2.06	2.51	0.998 6	
	8	延 10	1.44	12.46	2.52	2.60	0.993 9	
	18	延 10	1.97	15.06	1.94	2.51	0.995 4	
	38	延 10	35.30	16.37	2.16	2.53	0.999 4	
	98	延 10	3.41	10.75	2.34	2.56	0.992 7	
均 值		延 10	1.90	12.36	2.35	2.55	0.996 3	16.43
2P-1	102	长 6	99.40	20.32	3.21	2.82	0.993 1	
	138	长 6	2.67	14.80	2.69	2.75	0.994 8	
	143	长 6	1.90	16.41	2.52	2.75	0.998 5	
	209	长 6	0.14	11.26	1.86	2.63	0.991 9	
	213	长 6	1.19	14.19	2.40	2.75	0.985 0	
	215	长 6	2.30	15.12	2.56	2.75	0.994 1	
均 值		长 6	2.41	15.35	2.54	2.74	0.992 9	19.39
2P-2	61	长 6	0.07	6.10	2.72	2.72	0.977 9	
	108	长 6	51.80	17.80	3.13	2.80	0.991 0	
	176	长 6	17.28	16.10	2.90	2.79	0.986 1	
	259	长 6	0.76	8.80	2.65	2.76	0.990 8	
	389	长 6	0.82	9.40	2.60	2.78	0.997 1	
	459	长 6	0.05	9.10	2.69	2.73	0.994 1	
均 值		长 6	1.12	11.20	2.78	2.77	0.989 9	

注: 渗透率均值为几何平均值; 其余参数均值为算术平均值。

5 孔隙结构分形维数的地质含义

由表 1 计算的延 10 段与长 6 段的孔隙结构分形维数, 结合薄片与地层测试等资料, 可以得到以下初步认识。

1) MHM 油田延 10 段储层的孔隙结构分形维数均值为 2.55, 长 6 段储层孔隙结构分形维数均值为 2.75。从分形维数的几何意义知道, 延 10 段储层孔隙结构较 6 段储层孔隙结构简单, 具体表现为孔隙表面光滑、孔隙喉道弯曲度小、连通性好。表现在储渗性能上, 延 10 段储层的油气充注及渗流特性要好于长 6 段, 这一认识已为试油结果所证实。事实上, 2P-1 井延 10 段试油初期产油 $12.5 \text{ m}^3/\text{d}$ 产水 $3.6 \text{ m}^3/\text{d}$ 而在长 6 段试油结果为含水层。

2) 延 10 段、长 6 段储层同属于低孔、低渗储层, 从表中的各个层段的渗透率变异系数和孔隙结构分形维数的关系可以看到, 孔隙结构分形维数越大, 渗透率的变异系数越大, 孔隙的非均质性越强。长 6 段的渗透率变异系数明显高于延 10 段, 主要是由长 6 段储层中长石等软矿物含量较高所造成。储层内的溶蚀等后期成岩作用虽然使孔隙度增大, 但由于溶蚀的非均匀性, 又造成了孔隙分布非均匀及孔隙表面的粗糙程度增大, 孔隙结构非均质性加剧。

3) 延 10 段储层孔隙结构分形维数在大孔隙段比小孔隙段小, 而长 6 段储层的分形维数分布特征却与延 10 段储层相反。结合成岩作用分析知道, 长 6 段储层内的溶蚀作用对大孔隙改造比较明显, 而在小孔隙区域, 较高的毛管压力使溶蚀流体不易进入。

4) 孔隙结构分形维数与矩形法求得的孔喉分选系数存在较好正相关关系 (图 3 图 4), 即孔隙结构分形维数越大, 其孔喉分选系数也越大, 表明分选的非均匀性严重。

6 结论

1) 延 10 段和长 6 段两个层段的毛管压力曲线都存在一个压力的标度区间, 在该区间内孔隙结构表现出分形特征和统计自相似性。同一块样品, 在标度区间内, 存在多重分形特征, 即不同区

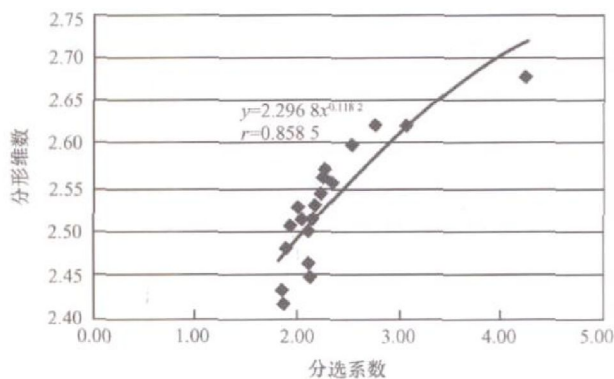


图 3 延 10 储层孔隙分形维数与分选系数的关系

Fig. 3 Pore fractal dimension vs sorting coefficient for Yan 10 reservoir

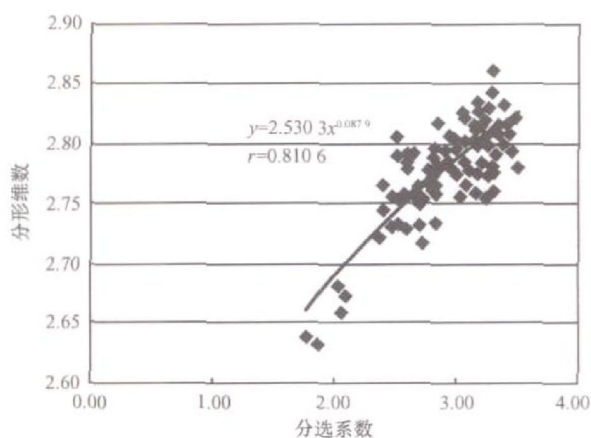


图 4 长 6 储层孔隙分形维数与分选系数的关系

Fig. 4 Pore fractal dimension vs sorting coefficient for Chang 6 reservoir

间存在不同的分形维数。延 10 段储层孔隙结构分形维数在大孔隙段比小孔隙段小, 而长 6 段储层的分形维数分布特征却与延 10 段储层相反, 两个储层中溶蚀作用对大、小孔隙的影响明显不同。

2) 延 10 段储层的孔隙分形维数在 2.42~2.67 之间, 平均为 2.54。长 6 段储层孔隙结构分形维数在 2.62~2.87 之间的, 平均为 2.78。延 10 段的分析维数要比长 6 段的小, 延 10 段储层的储集性和渗流特性好。另一方面, 长 6 段储层孔隙结构分形维数较大, 表明孔隙结构非均质性强, 在注水开发过程中, 会造成水驱推进不均匀, 无水采收期缩短。

3) 孔隙结构分形维数与矩形法确定的孔喉分选系数呈较好的正相关关系。分形维数与分选系数是不同途径求取的参数, 但均是反映孔隙结构非均质程度的参数, 两者的正相关关系也反映了这两个参数均能从某个方面表征孔隙结构的

特征。

4) 不同层段孔隙结构的不同分形维数及同一层段大孔隙与小孔隙结构特征的差异, 进一步揭示了鄂尔多斯盆地 MHM 油田三叠系延长组和侏罗系延安组储层孔隙结构的复杂性以及建立双孔隙含水饱和度模型的必要性。

参 考 文 献

- 1 赵红格, 刘池洋, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地西缘构造分区及其特征 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(2): 176~178
- 2 郭忠铭. 陕甘宁盆地构造特征及油气勘探 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1989
- 3 李红, 柳益群, 刘林玉. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长 8₁ 低渗透储层成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(2): 211~216
- 4 张哨楠, 胡江奈, 沙文武, 等. 鄂尔多斯盆地南部镇泾地区延长组的沉积特征 [J]. 矿物岩石, 2003 20(4): 25~30
- 5 张大伟, 陈发景, 程刚. 松辽盆地大情字井地区高台子油层储集层孔隙结构的微观特征 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27(5): 669~673
- 6 李克文, 沈平平. 分形几何及其在石油工业中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 1990 17(5): 23~27
- 7 Dullien F A, Dhawan G K. Characterization of pore structure by a combination of quantitative photomicrography and Mercury porosimetry [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1974 47(2): 337~342
- 8 Bale H D, Schmidt P W. Small angle X-ray scattering investigation of submicroscopic porosity with fractal properties [J]. Phys, 1984 53(6), 596~598
- 9 谢正温, 谢渊, 王剑, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区延长组主要油层组储层特征 [J]. 石油实验地质, 2005 27(6): 579~580
- 10 罗蛰潭, 王允诚. 气储集层的孔隙结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1986 106~123
- 11 贺承祖, 华明琪. 油气藏物理化学 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1995 66~75
- 12 Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. San Francisco: San Francisco Press, 1982 23~24
- 13 Iovane G, Laserra E, Tortorello F S. Stochastic self-similar and fractal universe [J]. Chaos Solutions & Fractals, 2004 19(4): 415~426
- 14 Falconer K J. Fractal geometry: mathematical foundations and applications [M]. London: John Wiley and Sons Press, 1996 171~174
- 15 李水根. 分形几何 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004 121~133
- 16 王域辉, 廖淑华. 沉积岩孔隙空间的分形结构 [A]. 见: 李厚文, 编. 分形理论及应用 [C]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993 327~336
- 17 贺承祖, 华明琪. 储层孔隙结构的分形几何描述 [J]. 石油与天然气地质, 1998 19(1): 15~23
- 18 Xu Y F, Dong P. Fractal approach to hydraulic properties in unsaturated porous media [J]. Chaos Solutions & Fractals, 2004 19(3): 327~337
- 19 李云省, 邓鸿斌, 吕国祥. 储层微观非均质性的分形特征研究 [J]. 天然气工业, 2002 22(1): 37~40
- 20 Turcotte D. Fractals and Chaos in geology and geophysics [M]. London: Cambridge University Press, 1997 50~56
- 21 Chen J D, Wilkinson D. Pore-scale viscous fingering in porous media [J]. Phys, 1985 55(2): 1892~1896

(编辑 武新民)

(上接第 109 页)

- 8 谢增业, 李剑, 单秀琴, 等. 川东北罗家寨飞仙关组气藏成藏过程及聚集效率 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26(6): 765~770
- 9 梁生正, 任铁扣, 曾宪云, 等. 渤海湾盆地天然气勘探方向与目标 [J]. 石油实验地质, 2005 27(6): 565~569
- 10 蔡立国, 饶丹, 潘文蕾, 等. 川东北地区普光气田成藏模式研究 [J]. 石油实验地质, 2005 27(5): 462~467
- 11 Heam C L, Ebanks W J. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartog Dra field Wyoming [J]. Petrol Tech, 1984 36 1 335~1 334
- 12 Ebanks W J. Flow unit concept integrated approach to reservoir description for engineering projects [J]. AAPG Bulletin, 1987 71(5): 551~552
- 13 Rodriguez Maraven S A. Facies modeling and the flow unit concept as a sedimentological tool in reservoir description [J]. Proceedings of the 1988 SPE 63rd Annual Technical conference and Exhibition, 1988 465~472
- 14 Ti G M, Hatzignation D G. Use of flow units as a tool for reservoir description: a case study [J]. SPE, 1995 10 122~128

(编辑 武新民)